



中华人民共和国国家标准

GB/T 36024—2018

金属材料 薄板和薄带 十字形试样双向拉伸试验方法

Metallic materials—Sheet and strip—
Biaxial tensile testing method using a cruciform test piece

(ISO 16842:2014, MOD)

2018-03-15 发布

2018-12-01 实施

中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言 I

引言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 符号及说明 2

5 试验原理 3

6 试样 4

7 试验方法 4

8 双向应力-应变曲线的测定 6

9 试验报告 8

附录 A (资料性附录) 本标准章条编号与 ISO 16842:2014 章条编号对照 9

附录 B (资料性附录) 本标准与 ISO 16842:2014 技术性差异及其原因 10

附录 C (资料性附录) 双向拉伸试验机 11

附录 D (资料性附录) 屈服面的测量方法 16

附录 E (资料性附录) 影响试样测量区最大等效塑性应变的因素 19

参考文献 21

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准使用重新起草法修改采用国际标准 ISO 16842:2014《金属材料 薄板和薄带 十字形试样的双向拉伸试验方法》(英文版)。

本标准与 ISO 16842:2014 相比在结构上有较多调整,附录 A 中列出了本标准与 ISO 16842:2014 的章条对照一览表。

本标准与 ISO 16842:2014 相比存在技术性差异,这些差异涉及的条款已通过在其外侧页边空白位置的垂直单线(|)进行了标示,附录 B 中给出了相应技术性差异及其原因的一览表。

为了便于使用,本标准还做了下列编辑性修改:

增加了“符号与说明”一章,删除了相应图表中的符号与说明,后面的章节序号顺延。

本标准由中国钢铁工业协会提出。

本标准由全国钢标准化技术委员会(SAC/TC 183)归口。

本标准起草单位:武汉钢铁有限公司、北京航空航天大学、首钢集团有限公司、深圳万测试验设备有限公司、冶金工业信息标准研究院、上海申力试验机有限公司、武汉科技大学、广州汽车集团股份有限公司。

本标准主要起草人:李荣锋、李晓星、薛欢、李涛、黄星、董莉、杨浩源、刘静、袁焕泉、郎利辉。

引 言

本标准规定了一种应用十字形试样进行双向拉伸试验时测量金属板材应力-应变曲线的方法。本标准规定了十字形试样的形状和应变测量的位置。在附录 C 以典型的实例描述了双向拉伸试验机及应遵循的要求。

本标准推荐的十字形试样具有下列特征：

- a) 十字形试样的测量区域确保了应力均匀性足够高,使双向应力的测量准确度满足要求；
- b) 在固定的应力比或应变速率比时能够测量金属板的弹塑性行为；
- c) 没有液压膨胀试验方法中遇到的平面外变形；
- d) 易于采用激光切割、水切或其他加工方法从金属板上切取下料。

金属材料 薄板和薄带
十字形试样双向拉伸试验方法

1 范围

本标准规定了金属薄板薄带十字形试样双向拉伸试验方法的术语和定义、符号及说明、试验原理、试样、试验方法、双向应力-应变曲线的测定和试验报告。

本标准适用于板厚不小于 0.1 mm 且不大于 0.08 倍试样臂宽(见图 1)的十字形试样进行双向拉伸试验测量金属板材应力-应变曲线的试验。试验温度范围为 10 ℃~35 ℃。其他温度条件下的双向拉伸试验也可参照本标准执行。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 16825.1 静力单轴试验机的检验 第 1 部分:拉力和(或)压力试验机测力系统的检验与校准(GB/T 16825.1—2008,ISO 7500-1:2004,IDT)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

十字形试样 **cruciform test piece**

双向拉伸试验推荐采用的试样,其形状和几何尺寸见图 1。

3.2

测量区域 **gauge area**

被十字形试样四个臂包围的中间正方形区域,见图 1。

3.3

拉伸臂 **tensile arm**

十字形试样上测量区域以外的部分。拉伸臂的作用是传递单向拉伸力,使十字形试样测量区域形成正交拉伸力,见图 1。

3.4

双向拉伸试验机 **biaxial tensile testing machine**

能够为十字形试样施加平面正交拉力的试验机(参见附录 C)。

3.5

屈服面 **yield surface**

在应力空间中,将每个应力路径从弹性变形进入塑性变形的各个屈服应力点连接起来,形成的一个区分弹性区和塑性区的分界面(见附录 D)。

表 1（续）

符号	说 明	单位
A_{Sx}	x 方向横截面积	mm^2
A_{Sy}	y 方向横截面积	mm^2
C	夹持部分长度	mm
L	狭缝长度	mm
R	臂与标距区域之间过渡圆角半径	mm
w_s	狭缝宽度	mm
应变		
e_x	x 方向工程应变	
e_y	y 方向工程应变	
ϵ_x	x 方向的真实应变	
ϵ_y	y 方向的真实应变	
ϵ_0^P	单向拉伸试验中 x 方向真实塑性应变	
$\epsilon_{\max}^P$	应变区域最大等效塑性应变	
力		
F_x	x 方向的力值	N
F_y	y 方向的力值	N
σ_x	x 方向的真实应力	MPa
σ_y	y 方向的真实应力	MPa
σ_0	双向拉伸试验中 x 方向与 W_0 相对应的拉伸真实应力	MPa
σ_{90}	双向拉伸试验中 y 方向与 W_0 相对应的拉伸真实应力	MPa
P	压力	N
斜率		
C_x	应力-应变曲线 $\sigma_x-\epsilon_x$ 弹性变形部分的斜率	MPa
C_y	应力-应变曲线 $\sigma_y-\epsilon_y$ 弹性变形部分的斜率	MPa
单位体积塑性功		
W_x	x 方向拉力消耗的单位体积塑性功	MPa
W_y	y 方向拉力消耗的单位体积塑性功	MPa
W_0	单向拉伸试验中 x 方向的塑性应变为 ϵ_0^P 时,所消耗的单位体积塑性功	MPa
应变硬化指数		
n	应变硬化指数	

5 试验原理

由厚度均匀的平板制备而成的十字形试样上施加平行于试样平面的正交拉伸力,同步连续测量十

GB/T 36024—2018

字形试样测量区域的应力和应变,绘出应力-应变曲线,得到屈服应力。测量出的应力-应变曲线用来确定试样的单位体积塑性功等值线(面)(参见附录 D)。十字形试样应变测量区域的塑性应变值依赖于应力比、拉伸臂狭缝的臂宽、应变硬化指数(n 值)(参见附录 E)和材料的各向异性。

注:采用 7.2.4 规定的应变测量位置时,对第 6 章推荐的十字形拉伸试样进行有限元分析,应力计算误差估计小于 2%。

6 试样

6.1 形状与尺寸

图 1 为本标准推荐使用的试样形状及尺寸,同时应满足以下要求:

- 一般情况下,试样厚度 a 等于原板材厚度,试样厚度方向无需任何加工。试样厚度方向需要加工的特例见 6.1b);
- 除非相关方另有协定,试样臂宽宜不小于 30 mm,4 个臂的宽度允许公差为 ± 0.1 mm,且应满足 $a \leq 0.08B$,如相关方有协定,为了满足 $a \leq 0.08B$,可以对试样厚度进行减薄;
- 每个臂上开 7 条狭缝,其中一条狭缝在试样的中心线上,各狭缝间等距,距离为 $B/8$,允许偏差为 ± 0.1 mm,所有狭缝长度相等,其两端对齐,允许偏差为 ± 0.1 mm,臂宽和狭缝长度满足 $B \leq L \leq 2B$;
- 狭缝宽度应尽量小, $w_s < 0.3$ mm;
- 夹持长度 C 应满足双向拉伸试验机的夹持要求,并能传递拉伸力到试样上。除非另有商定,一般采用推荐夹持长度,即 $B/2 \leq C \leq B$;
- 相关方也可以协定采用其他几何尺寸的十字形试样,但应对应力测量准确度进行说明。

6.2 试样制备

试样制备应满足以下要求:

- 试料(取样母板)的厚度公差和平面度公差应符合相应产品标准规定;
- 十字形试样的两个正交方向应分别平行于板材的纵向(轧向)和横向。经协商,十字形试样的两个正交方向也可以采用其他方向;
- 试样的加工(包括狭缝)可采用激光切割、水刀切割等加工方法;
- 除非有特殊要求,试样加工时应避免变形或者受热。

7 试验方法

7.1 试验机

双向拉伸试验机的要求如下(典型例子参见附录 C):

- 在试验过程中,试验机应能够在同一平面内持续夹持十字试样的四个夹持端,且公差为 ± 0.1 mm;
- 两个相对夹头应能在同一直线上移动(分别称之为 x 轴和 y 轴), x 轴和 y 轴垂直相交,误差精确到 $90^\circ \pm 0.1^\circ$ (x 轴和 y 轴构成的平面称之为参考平面, x 轴和 y 轴的交点称之为试验机的中心);
- 安装试样前,应有从试验机中心等距离同步调节两个相对夹头的功能,两个相对夹头彼此之间等距离同步移动误差在 ± 0.1 mm 之内;
- 安装试样时,应有调节试样中心与试验机中心位置对中的功能;

- e) 试验过程中,试验机应能维持试样中心位置与试验机中心位置保持一致,对中偏差不超过 $\pm 0.1\text{ mm}$ (如图 C.1 和图 C.2 那样的连接机制确保两个相对夹头等距离同步移动);
- f) 试验机应能伺服控制双向拉伸试验(见 C.2),根据试验目的不同,控制方式可以是恒定应力比(恒定力值比)、恒定真实应力比、恒定应变速率比。对于链接型双向拉伸试验机,应能保证等位移相对运动(见 C.3);
- g) 现代控制电子技术允许独立或联合控制作动器,即控制模式(见 C.4);
- h) 双向拉伸试验过程中,试验机应能记录和存储与时间对应的 x 轴和 y 轴四个通道的力值和应变。

7.2 力与应变的测量方法

7.2.1 通则

本节描述了测量十字形试样 x 轴和 y 轴方向拉力(F_x 、 F_y)和工程应变(e_x 、 e_y)的方法。

7.2.2 力值测量方法

为了能准确测量 x 轴和 y 轴方向的载荷,试验机二个方向的传感器应按照 GB/T 16825.1 的规定进行标定,力值准确度应为 1 级或优于 1 级。

7.2.3 应变测量方法

工程应变(e_x 、 e_y)的测量可采用应变片或者其他测量方式进行测量,如光学测量系统。测量 e_x 和 e_y 应能准确到 0.000 1 或者更高。

7.2.4 应变测量位置

图 2 描绘了测量应变(e_x 、 e_y)的应变片的粘贴位置,应变片的位置与试样的中心距离为 $(0.35 \pm 0.05)B$,应变片的方向与最大拉伸力方向平行。应变测量位置也可协商确定。

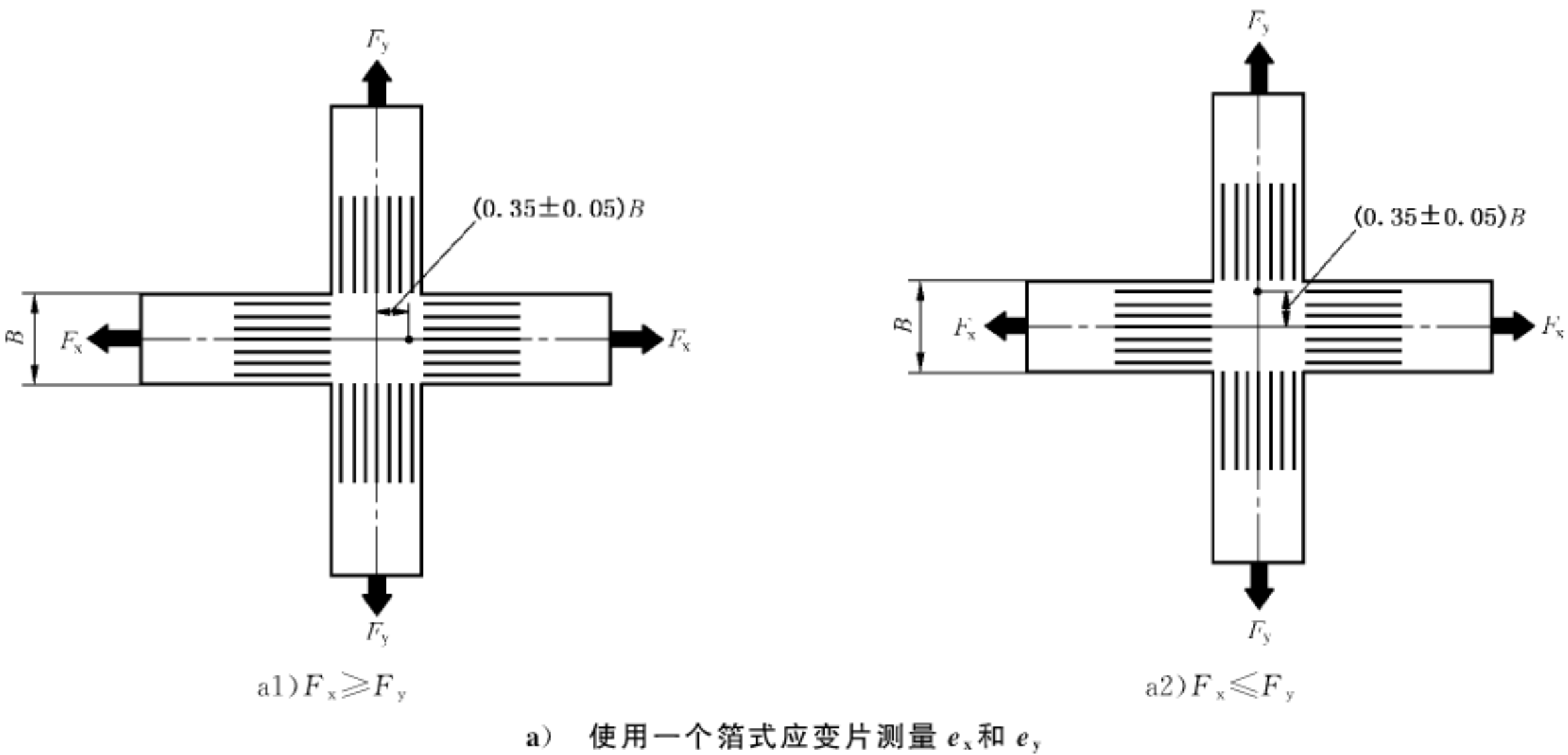


图 2 应变测量的位置

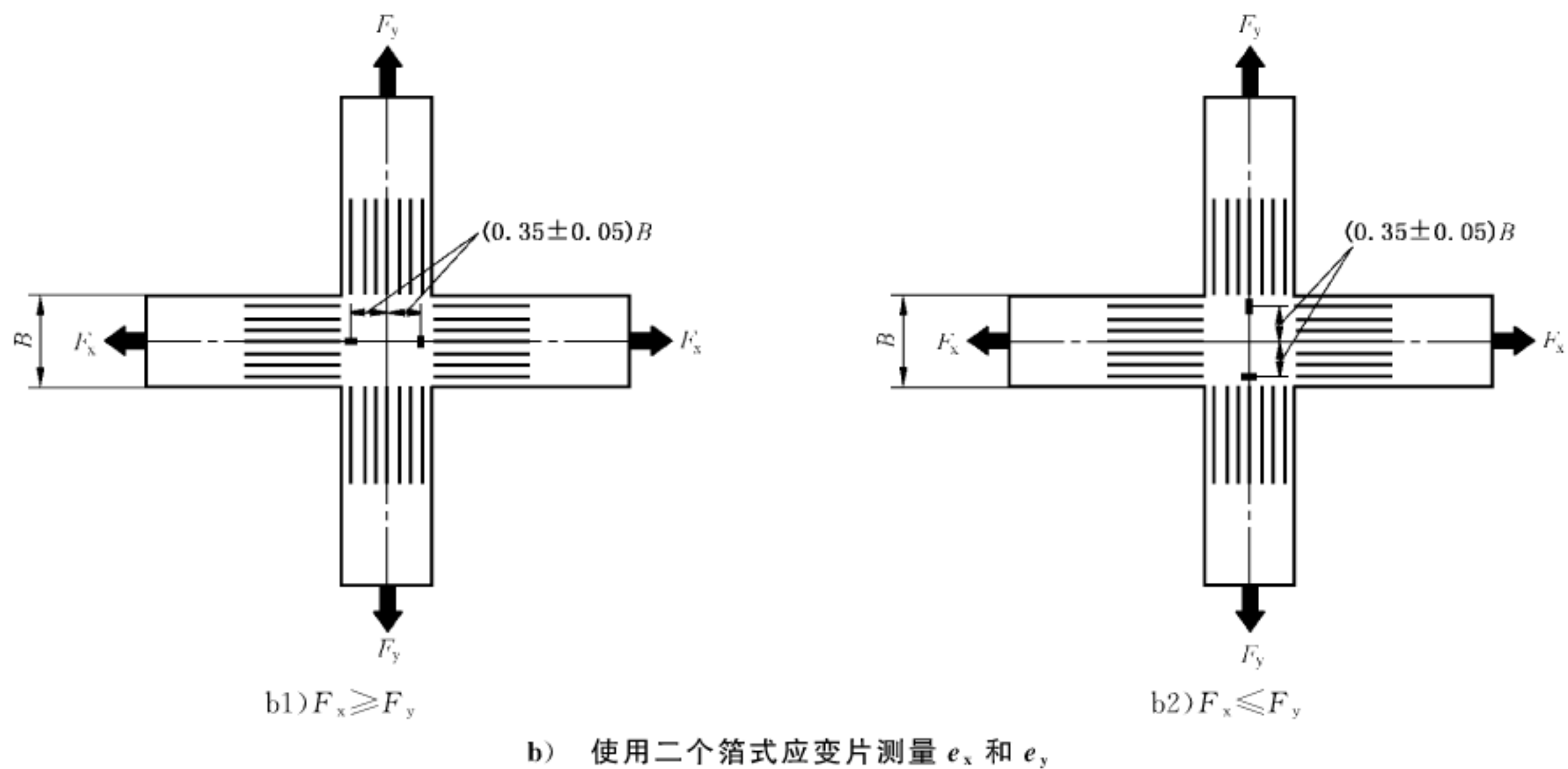


图 2 (续)

7.3 试样的安装

试样安装在双向拉伸试验机的四个夹头上,应保证试样的中心与试验机的中心一致。

7.4 测量方法

双向拉伸力加载到试样上时,应保证力值比、真应力比、应变速率比或者夹头位移速率比恒定。按照恒定的时间间隔记录并存储 (F_x, F_y) 和 (e_x, e_y) 数据。当达到指定的应变或应力,或试样断裂,或颈缩在试样夹持臂上或测量区域,终止试验。推荐的应变速率范围为 $0.000\ 1\ \text{s}^{-1} \sim 0.1\ \text{s}^{-1}$ 。

注:对于应变路径突变的情况也可采用相似的方法(参见附录 D.3)。

8 双向应力-应变曲线的测定

8.1 通则

根据测量得到的数据 (F_x, F_y) 和 (e_x, e_y) ,确定十字形试样 x 和 y 方向的应力-应变曲线。这些曲线用来确定试验材料的单位体积塑性功等值线(面)(参见附录 D.2)。

8.2 试样原始横截面积的测定

可通过式(1)和式(2)计算试样测量区域 x 和 y 方向的横截面积 A_{Sx} 和 A_{Sy} :

$$A_{Sx} = a \times B_{Sy} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$A_{Sy} = a \times B_{Sx} \quad \dots\dots\dots (2)$$

应使用有足够准确度的千分尺测量厚度 a ,准确到 $0.01\ \text{mm}$ 。 B_{Sx} 和 B_{Sy} 测量准确度至少达到 $0.1\ \text{mm}$ 。 A_{Sx} 和 A_{Sy} 计算值应按照 GB/T 8170 修约到 $0.1\ \text{mm}^2$ 。

8.3 真实应力的确定

按照式(3)和式(4)计算真实应力。

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_{Sx}} (1 + e_x) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_y = \frac{F_y}{A_{Sy}}(1 + e_y) \quad \dots\dots\dots(4)$$

8.4 真实应变的确定

按式(5)和式(6)计算 x 与 y 方向上的真实应变 ϵ_x 和 ϵ_y 。 ϵ_x 和 ϵ_y 计算到 10^{-5} , 再按照 GB/T 8170 修约到 10^{-4} 。图 3 是超低碳冷轧钢板在双向拉伸试验测量中真实应力-真实应变曲线的例子, 并与相同材料沿轧制方向的单轴拉伸应力-应变曲线进行了比较。

$$\epsilon_x = \ln(1 + e_x) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$\epsilon_y = \ln(1 + e_y) \quad \dots\dots\dots(6)$$

注: 如果测得的应变为真实应变 ϵ_x 和 ϵ_y , 则需再利用式(3)~式(6)求出真实应力。

8.5 真实塑性应变的计算

按式(7)和式(8)计算 x 与 y 方向上的真实塑性应变 ϵ_x^P 和 ϵ_y^P 。 ϵ_x^P 和 ϵ_y^P 计算到 10^{-5} , 再按照 GB/T 8170 修约到 10^{-4} 。图 4 是超低碳冷轧钢板在双向拉伸试验测量中真实应力-真实塑性应变曲线的例子, 并与相同材料沿轧制方向的单轴拉伸应力-应变曲线进行了比较。

$$\epsilon_y^P = \epsilon_y - \frac{\sigma_y}{C_x} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$\epsilon_x^P = \epsilon_x - \frac{\sigma_x}{C_y} \quad \dots\dots\dots(8)$$

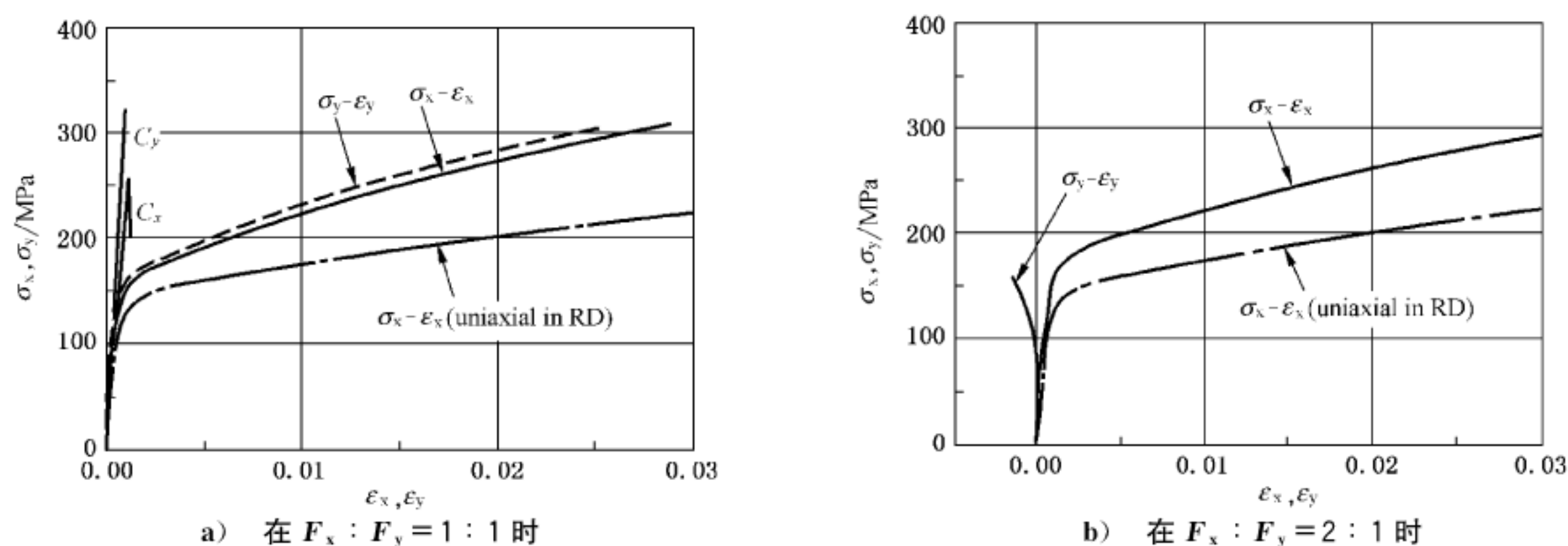


图 3 超低碳冷轧钢板双向拉伸真实应力-真实应变曲线

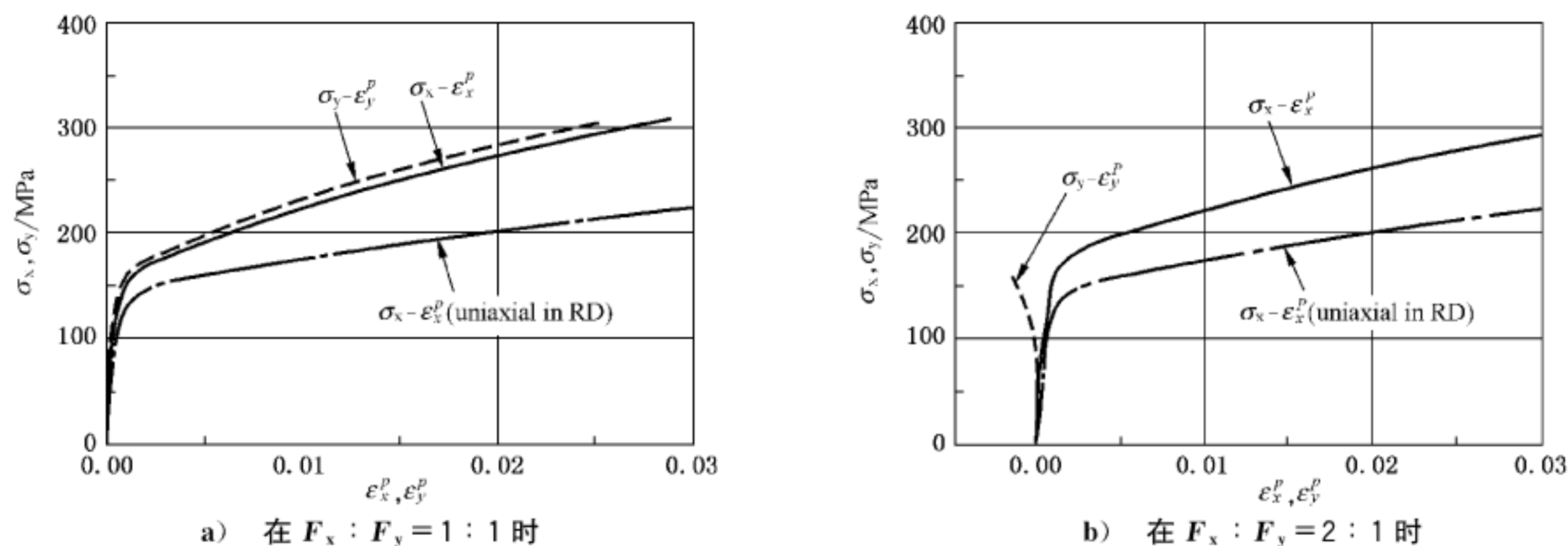


图 4 超低碳冷轧钢板双向拉伸真实应力-真实塑性应变曲线

9 试验报告

9.1 报告中的信息

除非另有要求,试验报告应至少包含以下信息:

- a) 本标准编号;
- b) 试样的标识;
- c) 材料名称;
- d) 试料和试样的厚度;
- e) 拉伸臂宽度、拉伸臂长度、夹持长度、狭缝长度、狭缝宽度、十字臂与测量区域夹角半径;
- f) 相对于轧制方向的试样取向;
- g) 应变测量方法;
- h) 试验温度;
- i) 试验机;
- j) 加载方式;
- k) 试验结果。

9.2 附加说明

在试验报告中建议添加以下记录:

- a) 试样制造记录;
- b) 试验后样品整体外观照片。

附 录 A
(资料性附录)

本标准章条编号与 ISO 16842:2014 章条编号对照

表 A.1 给出了本标准章条编号与 ISO 16842:2014 章条编号对照一览表。

表 A.1 本标准章条编号与 ISO 16842:2014 章条编号对照表

本标准章条编号	对应的 ISO 标准章条编号
4	—
5	4
6	5
7	6
8	7
9	8
附录 A	—
附录 B	—
附录 C	附录 C
附录 D	附录 A
附录 E	附录 B
注：表中章条以外的本标准其他章条编号与 ISO 16842:2014 的章条编号均相同且内容相对应。	

附 录 B
(资料性附录)

本标准与 ISO 16842:2014 技术性差异及其原因

表 B.1 给出了本标准与 ISO 16842:2014 技术性差异及其原因的一览表。

表 B.1 本标准与 ISO 16842:2014 技术性差异及其原因

本标准的章条编号	技术性差异	原因
1	标准规定的内容中增加了符号及说明。 适用范围中增加了其他温度条件下的双向拉伸试验也可参照本标准执行	以符合我国国情,与后续增加内容保持一致
2	关于规范性引用文件,本标准做了具有技术性差异的调整,调整的情况集中反映在第 2 章“规范性引用文件”中,具体调整如下: ——增加引用了 GB/T 8170(见 8.2、8.4、8.5)以代替 ISO 80000-1 ——增加引用了 GB/T 16825.1(见 7.2.2)	以符合我国国情
3.3	将原文 3.3 中的 arm/臂,分别修改为拉伸臂/tensile arm	使符号的定义更明确
4	增加本章	为使用标准中所用符号更加方便
6.1 图 1	其中符号说明集中放入了第 4 章中	便于符号查找
7.2	用 GB/T 16825.1 代替了 ISO 7500-1	以符合我国国情
7.2 图 2	取消了注解,将图下的符号说明集中放入了第 4 章中	便于符号查找
8.2、8.4 及 8.5	用 GB/T 8170 代替 ISO 80000-1	以符合我国国情
8.4	增加了注:如果测得的应变为真实应变 ϵ_x 和 ϵ_y ,则需再利用公式(3)~公式(6)求出真实应力	增加标准的可操作性,便于标准的执行
9.1	增加了本标准编号	增加标准的可操作性,便于标准的执行
附录 C	增加了一些我国的技术装备	以符合我国国情
文献	增加了一些文献	以符合我国国情

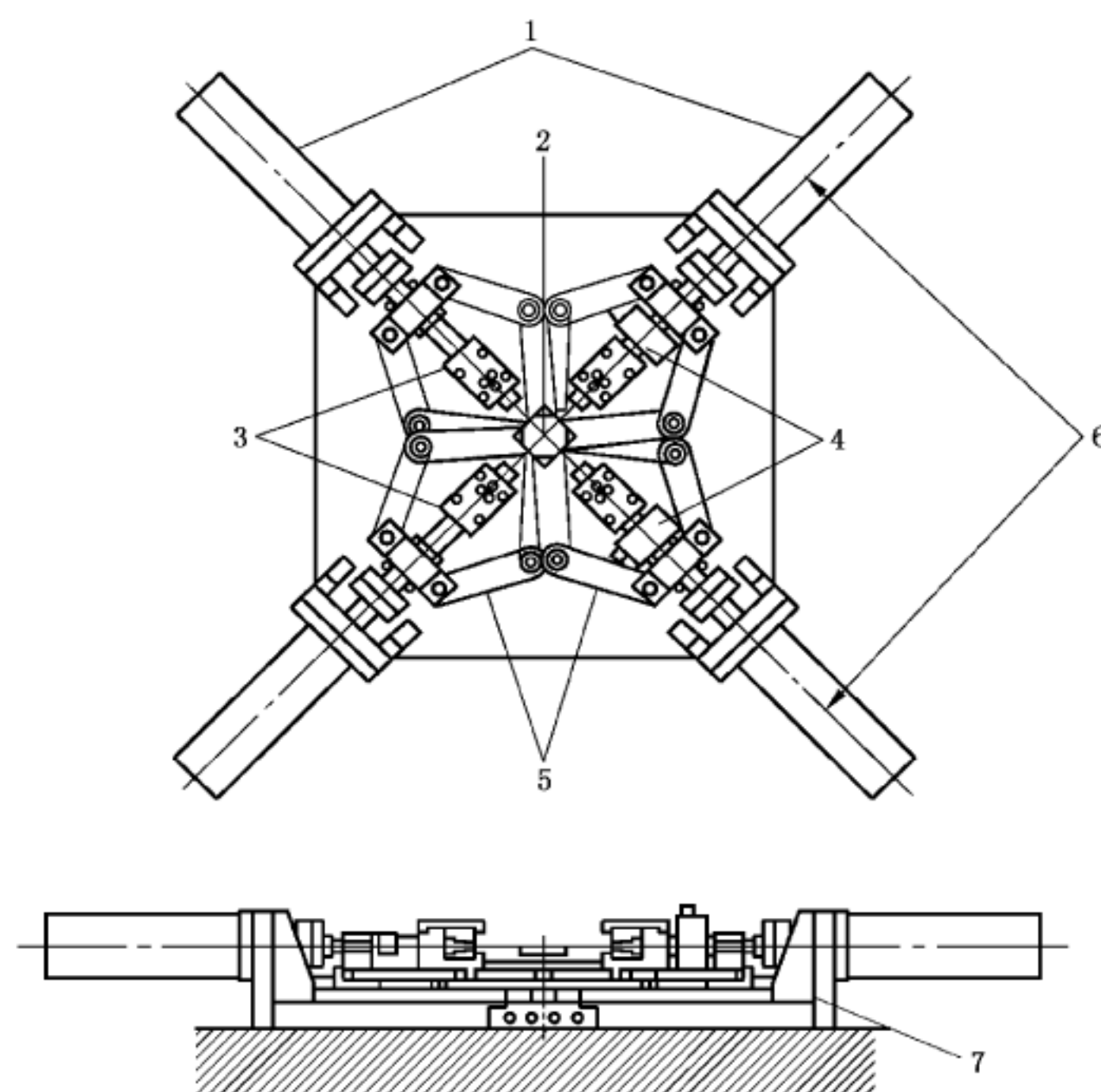
附 录 C
(资料性附录)
双向拉伸试验机

C.1 通则

本附录给出了几种双向拉伸试验机的实例。

C.2 伺服控制双向拉伸试验机

图 C.1 为一种伺服控制的双向拉伸试验机结构图。主体包括框架、正交排列的四个作动器(液压缸或马达)、连接作动器的夹头和安装在每个轴上的载荷传感器。液压压力通过液压管线传递到彼此相对的液压缸,保证每个液压缸受力相同。每对液压缸通过伺服单独控制。根据文献的建议同一方向相对两轴间采用了连杆同步机构以保证十字形试样的中心始终在试验机的中心。每个加载方向有一个传感器。采用伺服作动器控制的试验机可实现应力比控制和应变率比控制。



说明:

- 1——作动器;
- 2——试样中心;
- 3——夹头;
- 4——传感器;

- 5——连接结构;
- 6——加载轴;
- 7——框架。

图 C.1 伺服控制双向拉伸试验机示意图

C.3 伺服链接型双向拉伸试验机

C.3.1 具有位移比调节功能的链接型双向拉伸试验机

图 C.2 为链接型双向拉伸试验装置图。将此种装置安装在现有的单拉试验机上,并从试验机顶部施加压力,则可对十字形试样进行拉伸,并保证十字夹头位移率恒定。

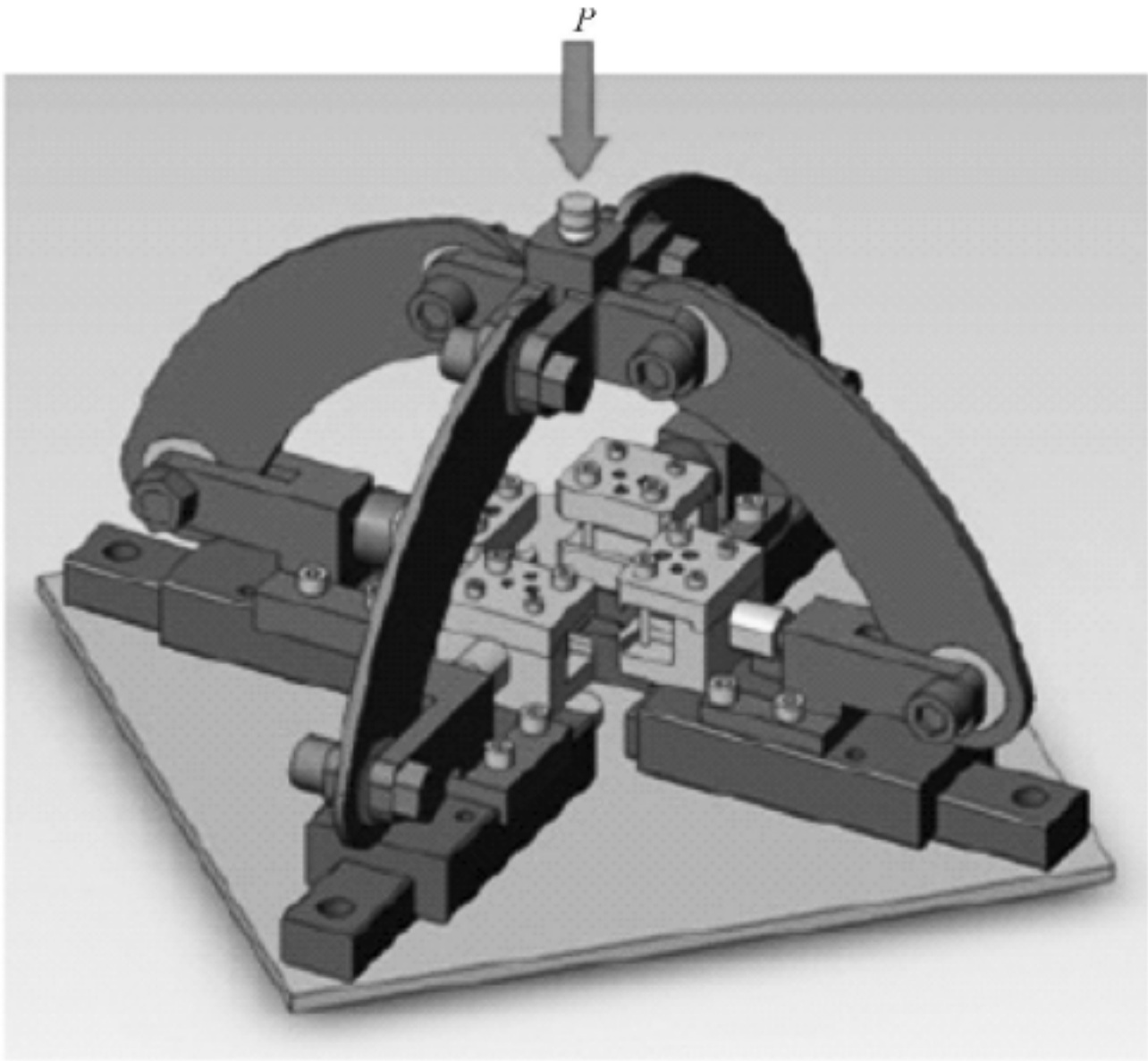
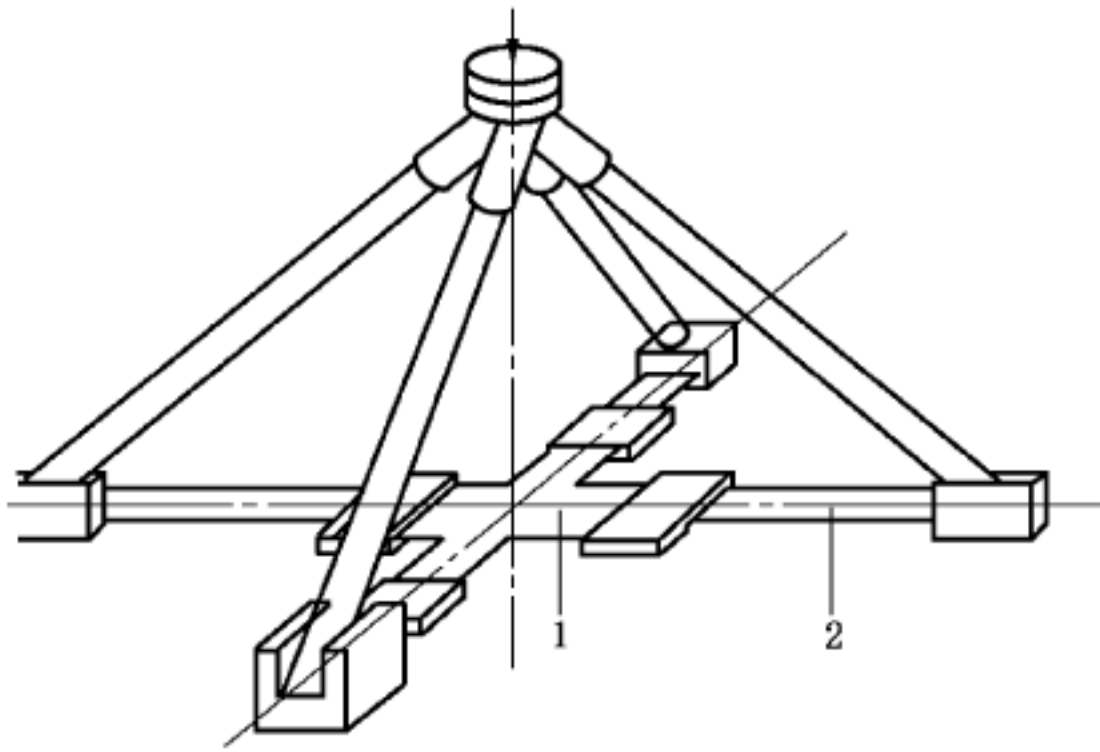


图 C.2 链接型双向拉伸试验机

C.3.2 机械式双向拉伸试验机

图 C.3 是一种机械式双向拉伸试验机,结构简单,使用方便。可直接在万能试验机上进行变应变比加载试验。利用万能试验机加载,但其测力部件是四个夹持测力传感器,并在夹持试件的平面内,上下都要安装五个夹紧螺帽,要求十字形试件的四个分枝在一个水平面上,而且在加载时不产生滑移。

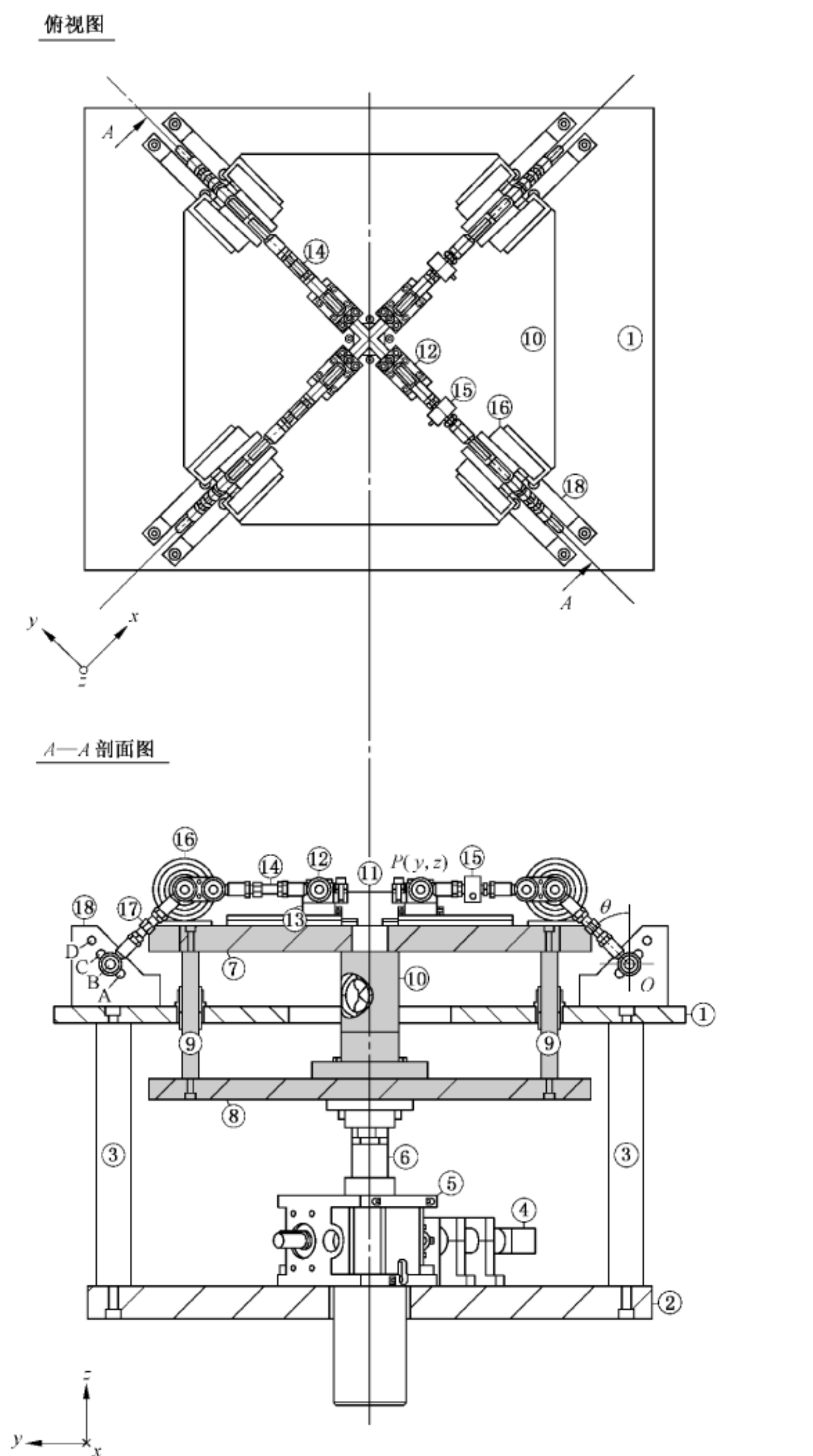


说明:
1——十字形试件;
2——传感器。

图 C.3 机械式双向拉伸试验机

C.3.3 具有载荷比调节功能的链接型双向拉伸试验机

图 C.4 为通过调节载荷比的双向拉伸试验机的链接类型图。通过调节不同角度调节每个方向的拉伸力。每个方向的传感器记录此方向的载荷。应用此种试验机可实现不同载荷比的控制。



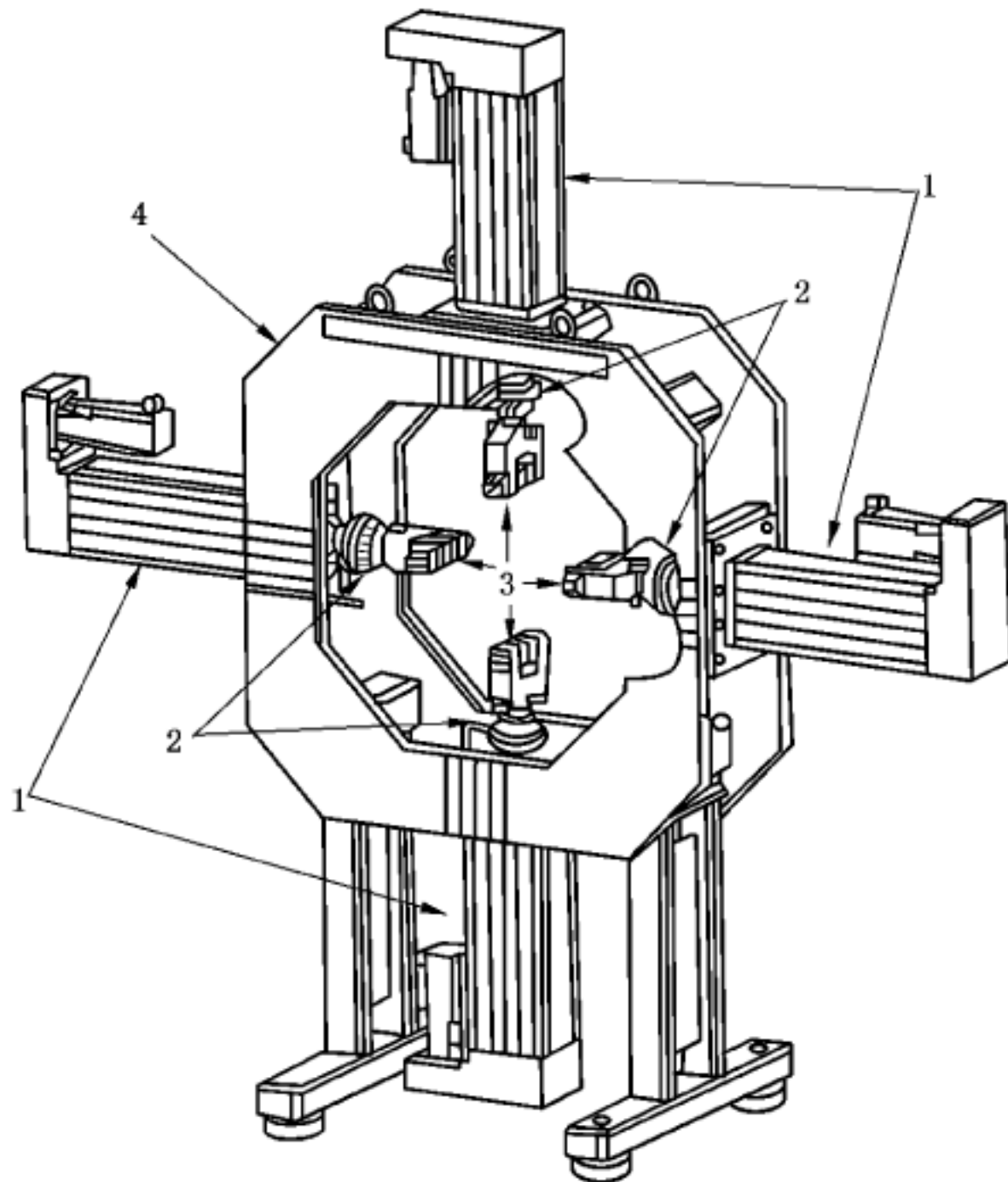
说明：

- | | | |
|------------------|-------------------|---------------|
| 1——安装板； | 7——顶板； | 13——线性轴承系统； |
| 2——基板； | 8——底板； | 14, 17——拉伸路径； |
| 3——直径为 60 mm 圆杆； | 9——直径为 30 mm 实心杆； | 15——拉力传感器； |
| 4——直流电机； | 10——工作台； | 16——滚珠轴承； |
| 5——涡轮千斤顶； | 11——试样； | 18——角度调整装置图。 |
| 6——起吊螺丝； | 12——夹具； | |

图 C.4 双向拉伸试验机的链接

C.4 电子驱动双向拉伸试验机

图 C.5 为垂直型框架的伺服控制的双向拉伸试验机。试验机上有四个电子驱动马达。每个电子驱动马达是独立控制的每个马达上包含力值、位移和应变记录传感器。试样位置中心的控制得到优化。因为每个马达独立控制,因此可实现不同应力比控制和应变控制的试验。

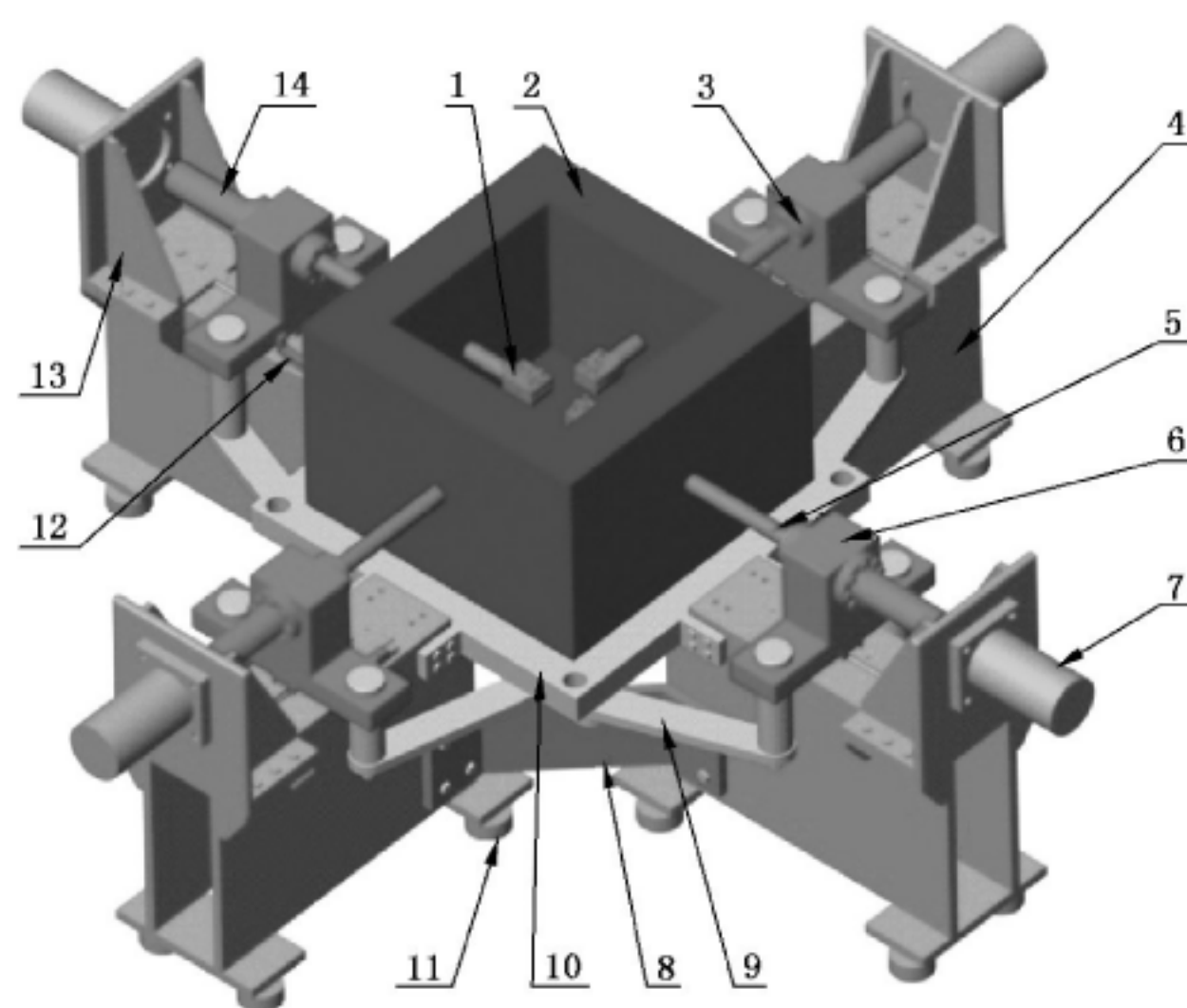


说明:
1——电子马达;
2——传感器;
3——夹头;
4——框架。

图 C.5 垂直框架型电子驱动双向拉伸试验机

C.5 热环境双向拉伸试验平台

图 C.6 为文献推荐的一种热环境双向拉伸试验机。该设备能满足变位移加载比例要求;加热炉加热温度可在室温至 800 ℃ 内保持恒定;采用光学散斑测量技术,能保证在高温下全场准确获得整个试件的应变数据。



说明：

- | | | |
|--------------|-----------|---------------|
| 1——夹头； | 6——同步连接器； | 11——地脚； |
| 2——加热炉； | 7——液压缸； | 12——导轨和位移传感器； |
| 3——轮辐式测力传感器； | 8——加强筋； | 13——支撑板； |
| 4——侧板； | 9——同步器； | 14——联轴器。 |
| 5——推杆； | 10——工作台； | |

图 C.6 热环境十字拉伸试验平台

附录 D
(资料性附录)
屈服面的测量方法

D.1 概述

本附录规定了金属板材屈服面的测量方法。双向拉伸应力得到的屈服面有利于定量评价金属材料的塑性变形特征和确定金属材料的屈服准则。由双向拉伸试验确定的屈服准则有利于提高金属板材成形过程中有限元计算的预测精度。

D.2 塑性变形功的测量方法

图 D.1 为金属板材塑性变形功的测量方法,首先进行沿材料轧制方向的单向拉伸实验,确定单向拉伸的真实应力 σ_0 , 以及通过预先确定的单向拉伸的真实塑性应变 ϵ_0^p 的值, 来确定单位体积的塑性功 W_0 , 在这种情况下, W_0 是由真实应力-真实塑性应变曲线的投影面积确定。然后, 采用保持特定比值的力值比 $F_x : F_y$ 或真实应力比 $\sigma_x : \sigma_y$ 进行双轴拉伸试验, 以及垂直于金属板材轧向的单拉试验。最后, 将多组真实应变点 $(\sigma_0, 0)$ 、 (σ_x, σ_y) 及 $(0, \sigma_{90})$, 绘制在主应力空间上, 与相应的塑性应变 ϵ_0^p 形成塑性功, 其中可确定相同数量的单位体积的塑性功 W_0 。当 ϵ_0^p 足够小时, 相应的塑性功实际上可作为材料的初始屈服面。

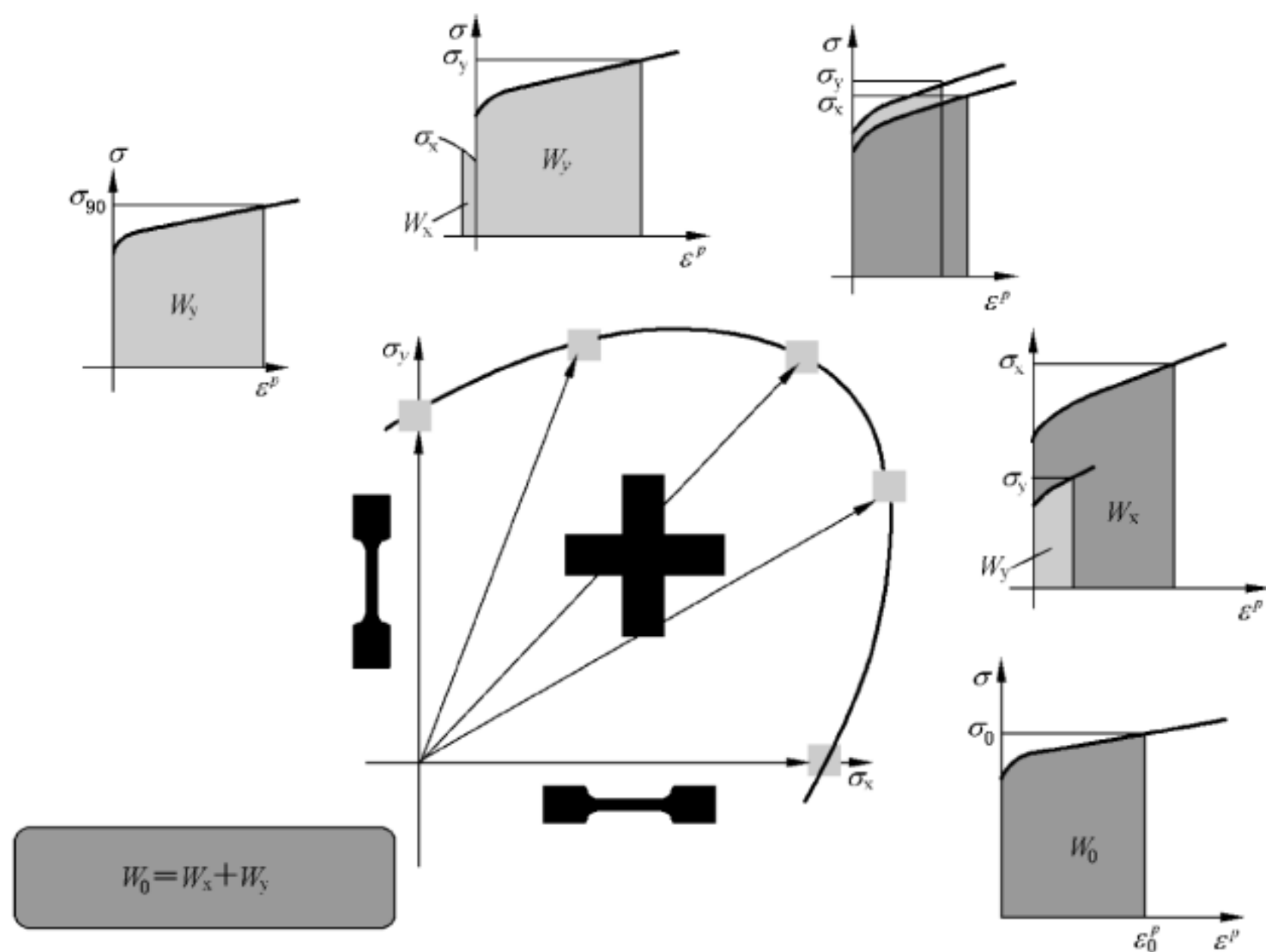
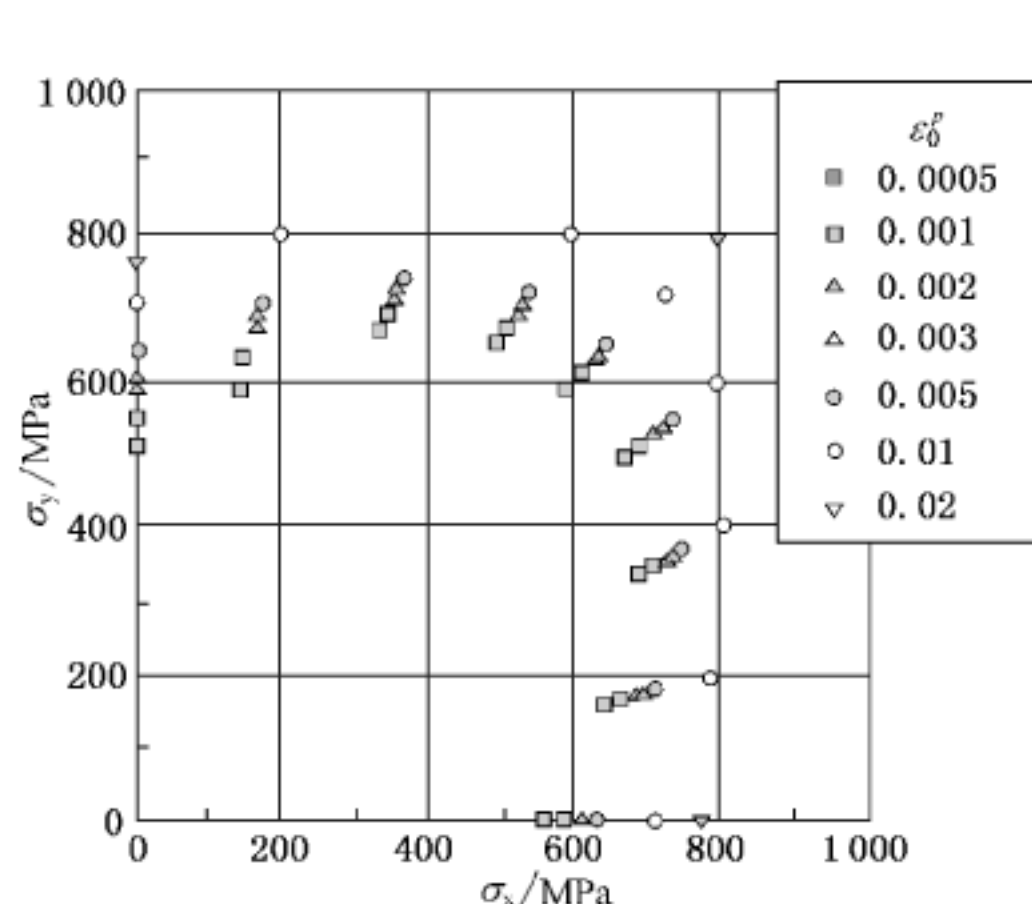
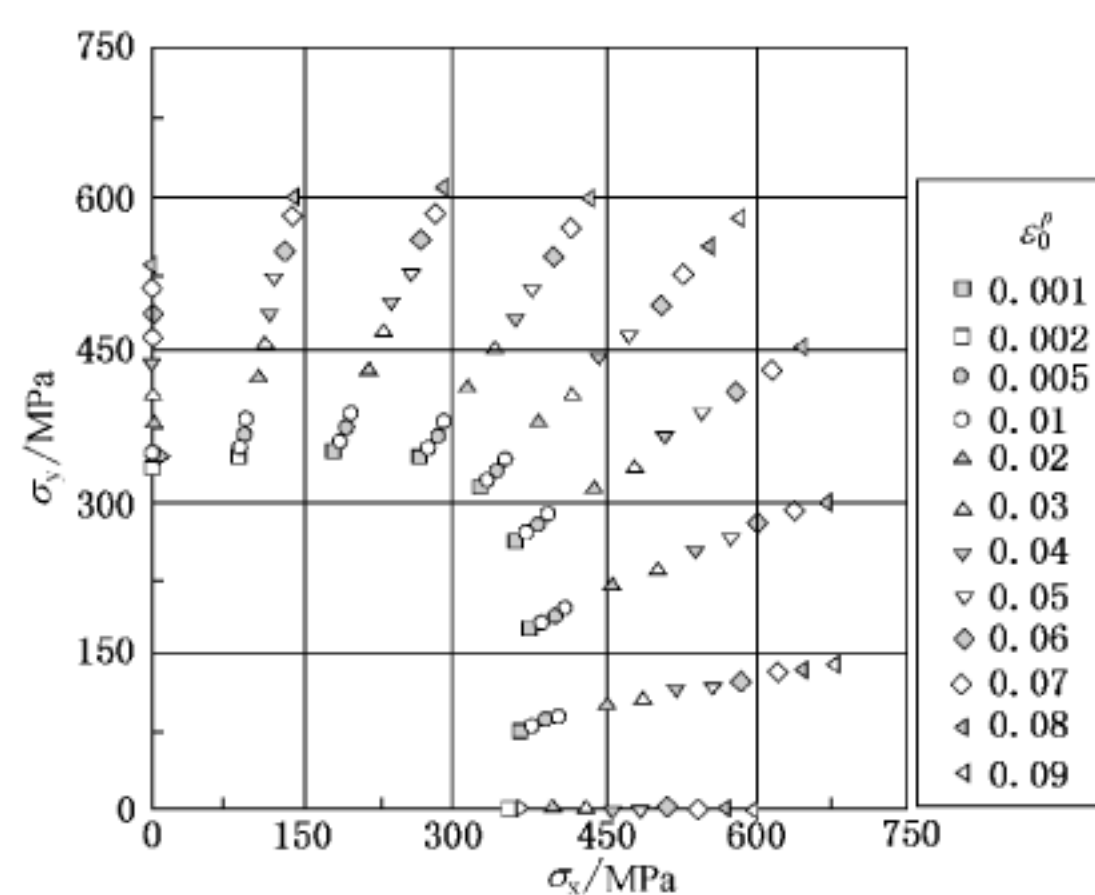


图 D.1 塑性功测定示意图

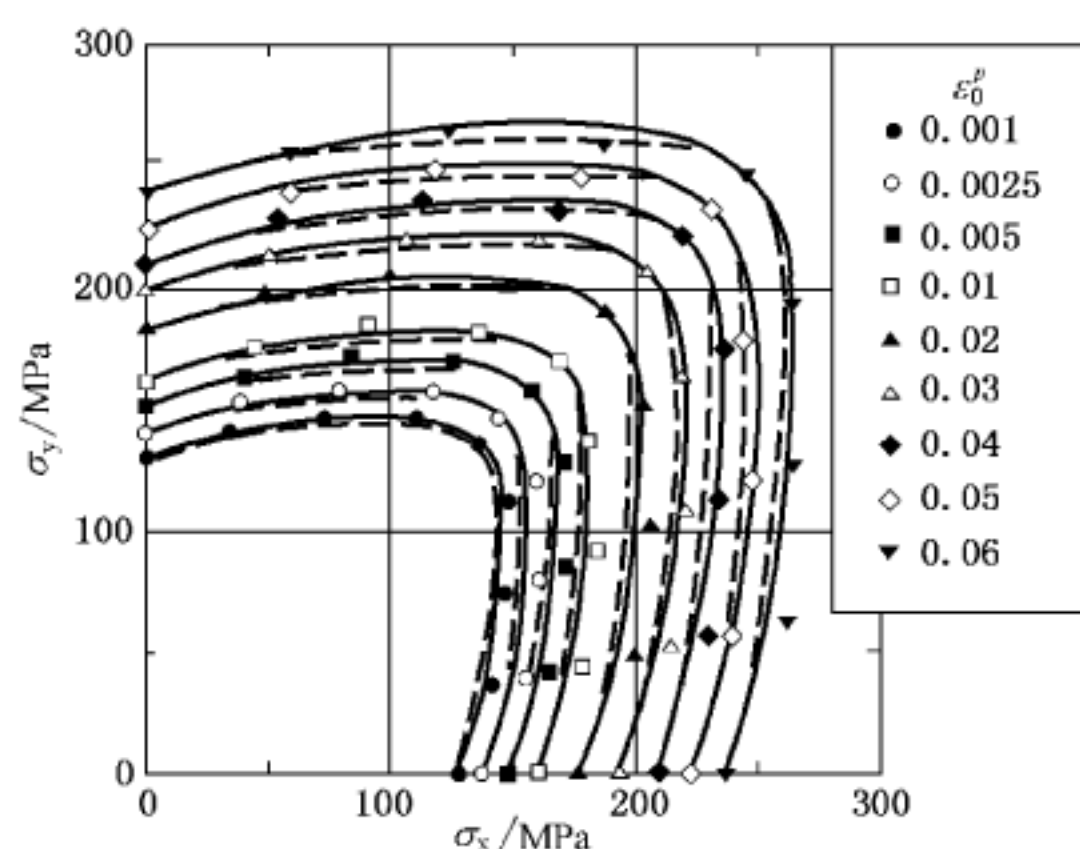
图 D.2 是采用图 1 的十字形试样进行的不同金属板材的双向拉伸试验得到的塑性功轮廓。拉力比 $F_x : F_y$ 是 1 : 0、4 : 1、2 : 1、4 : 3、1 : 1、3 : 4、1 : 2、1 : 4 和 0 : 1。对于 1 : 0 和 0 : 1 的拉力比, 采用的是标准单向拉伸试验。



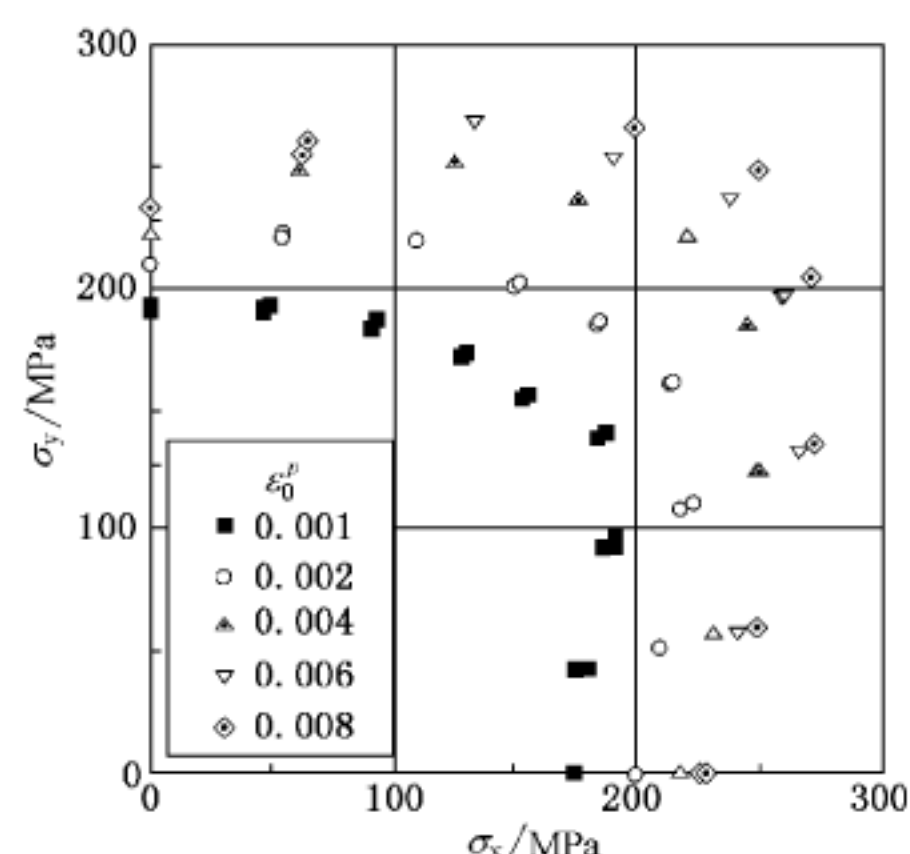
a) 屈服强度为 780 MPa 的高强钢



b) SUS304 不锈钢板



c) 5000 系列铝合金



d) AZ31 镁合金板

图 D.2 用双向拉伸测试方法测量塑性功的案例

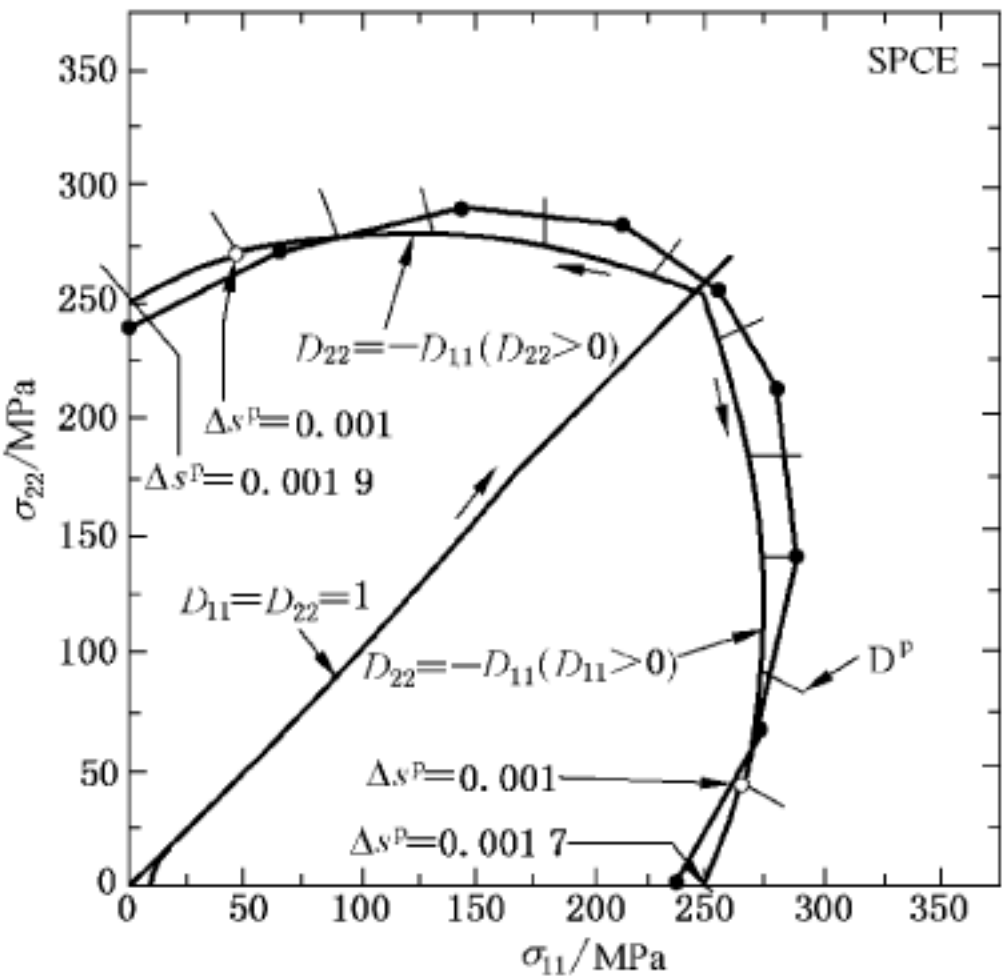
D.3 用应变路径快速变化法测定屈服顶点和后继屈服面

一般通过从弹性区到塑性区很多不同应力方向进行测量来确定屈服面。根据晶体塑性理论预测,后继屈服面上加载处可能存在死角,因此文献[1]提出了在测量屈服面时需要通过卸载来消除这种死角。

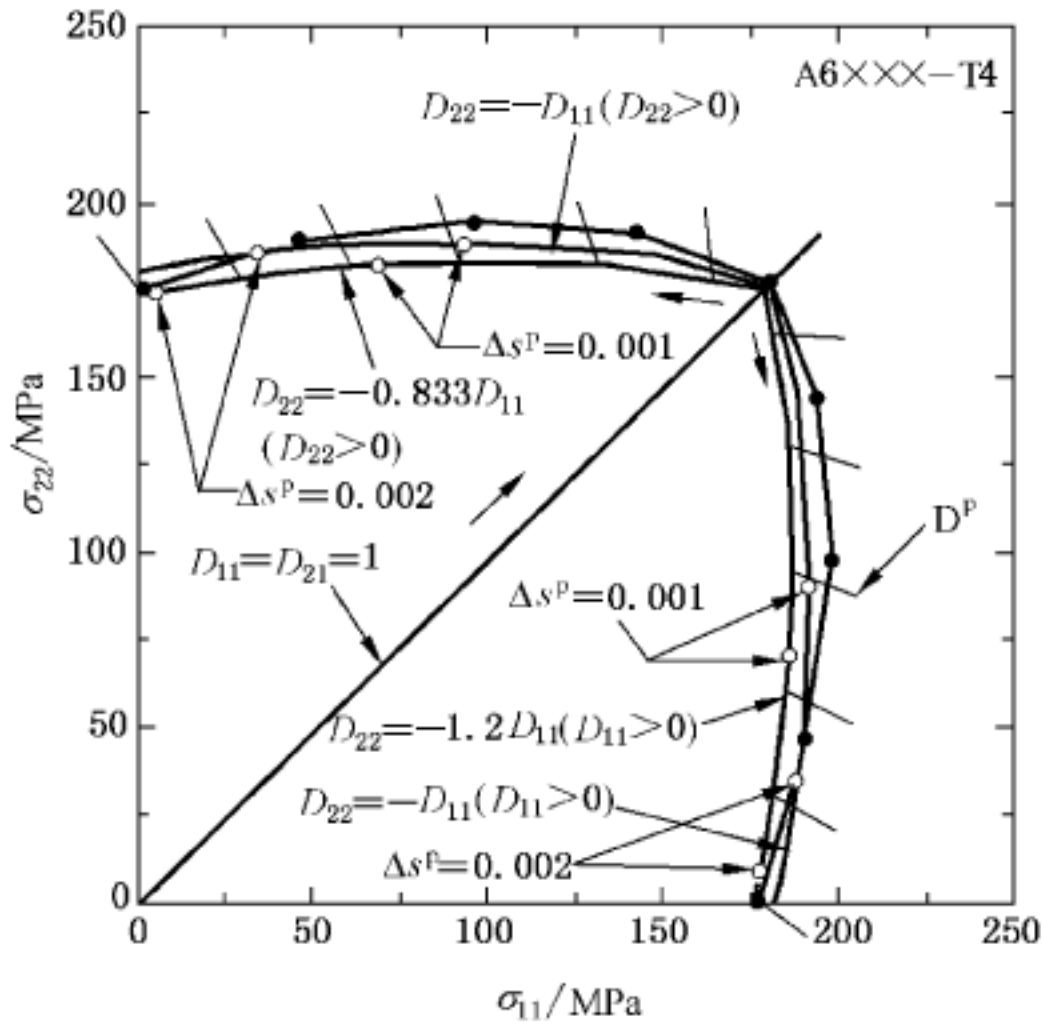
文献[8]提出了一种测定当前加载点附近后继屈服面形状的新方法。该方法预设了一条终点为所研究的加载点的比例应变路径,然后设置了一条快速应变路径致使应力沿屈服面快速移动。这种测定方法无需任何卸载,避免了从弹性区开始测量来确定后继屈服面所需要的卸载。因此这种方法能够测量加载点处的屈服顶点。

文献[4]就把这种应变路径突变法应用于十字试样,成功测量了应变速率下的屈服和非常规的塑性应变速率行为。采用图 1 所示的试样,图 B.3 展示了在闭环液压伺服双向拉伸试验机观察到的铝合金和 IF 钢屈服轨迹。在应变加载等双向拉下, $D_{11} = D_{22} > 0$, 这时名义应变 $e_{11} = e_{22} = 0.01$, 应变速率突然变到 $D_{11} = -D_{22} > 0$ 或 $D_{22} = -D_{11} > 0$ 。很显然应变路径的突变造成的 $D_{22} = -D_{11}$, 这时的应变变量是在塑性区的屈服应力造成的,而不会是弹性区的非屈服应力。因而可以得到图中加载点的屈服矢量。

文献[10]采用与图 1 不同尺寸的试样在亚稳奥氏体钢上进行了类似的试验。



a) 冷弯低碳不锈钢板



b) 6000 系列铝合金

注：• 是沿不同应力加载路径测得的应力值。

图 D.3 随应变路径改变的屈服轨迹

附录 E

(资料性附录)

影响试样测量区最大等效塑性应变的因素

E.1 概述

本标准使用的十字形试样的四个臂受到单向拉伸的作用,因此每次测试时,当工程应力达到材料的抗拉强度时,试验即结束。因此,可以应用试样受拉时的最大载荷估计最大等效塑性应变 $\epsilon_{\max}^P$ 。 $\epsilon_{\max}^P$ 主要受受力值比 $F_X:F_Y$ 、材料的应变硬化指数 n 值(参见 GB/T 5028)、十字形试样的狭缝宽度 W_s 、材料的各向异性等因素的影响。本附录仅介绍了材料的应变硬化指数 n 值和十字形试样的狭缝宽度 W_s 对 $\epsilon_{\max}^P$ 的影响。

E.2 应变硬化指数(n 值)的影响

图 E.1 描述了十字形试样的狭缝宽度为试样臂宽的 1%,狭缝数量为 7 时,应变硬化指数(n 值)与 $\epsilon_{\max}^P$ 的关系。应变硬化指数 n 值越大, $\epsilon_{\max}^P$ 则越大。这是因为材料应变硬化指数 n 值越大,随着试样拉伸臂的塑性变形,应力增长速率越高,反过来导致试样变形区应力的增大。值得注意的是,图 E.1 的 $\epsilon_{\max}^P$ 只作为参考,因为这些值是假定材料各向同性,并且基于简单塑性力学和最大载荷条件的数值分析求解得出的结论。

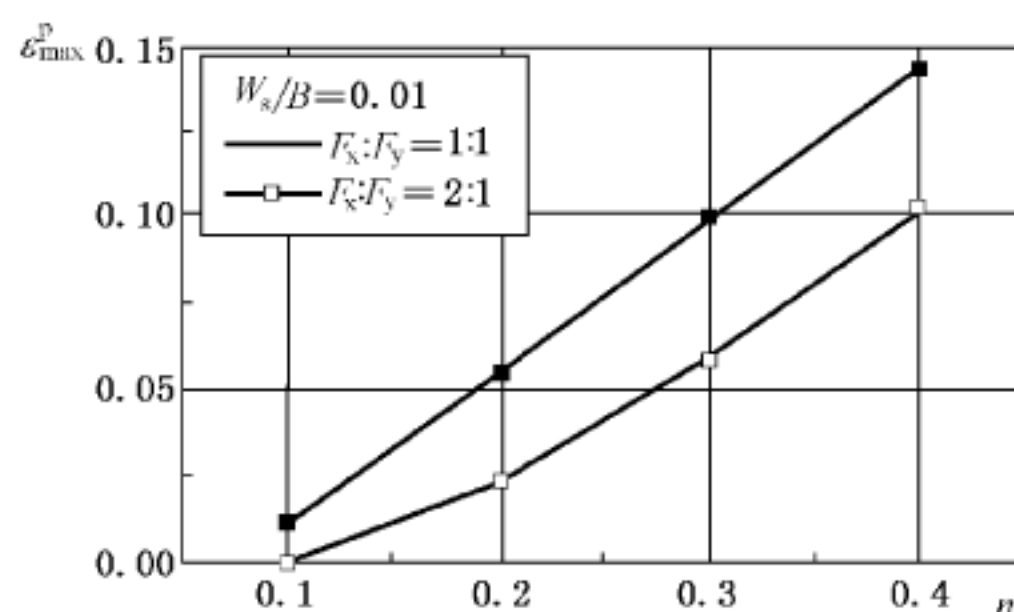


图 E.1 应变硬化指数 n 值与 $\epsilon_{\max}^P$ 的关系(材料模型: Von Mises 屈服准则)

E.3 狭缝宽度的影响

图 E.2 描述了当力值比为 2:1 和 1:1 时,狭缝数量为 7 时,狭缝宽度对 $\epsilon_{\max}^P$ 的影响。随着狭缝宽度的增大,试样臂的有效横截面积减少,传递到应变区域的力值减少,最终导致 $\epsilon_{\max}^P$ 的减少。应注意的是,图 E.2 仅供参考,因为这些值是假定材料各向同性,并且基于简单的塑性力学和最大载荷条件的数值分析求解得出的结论。

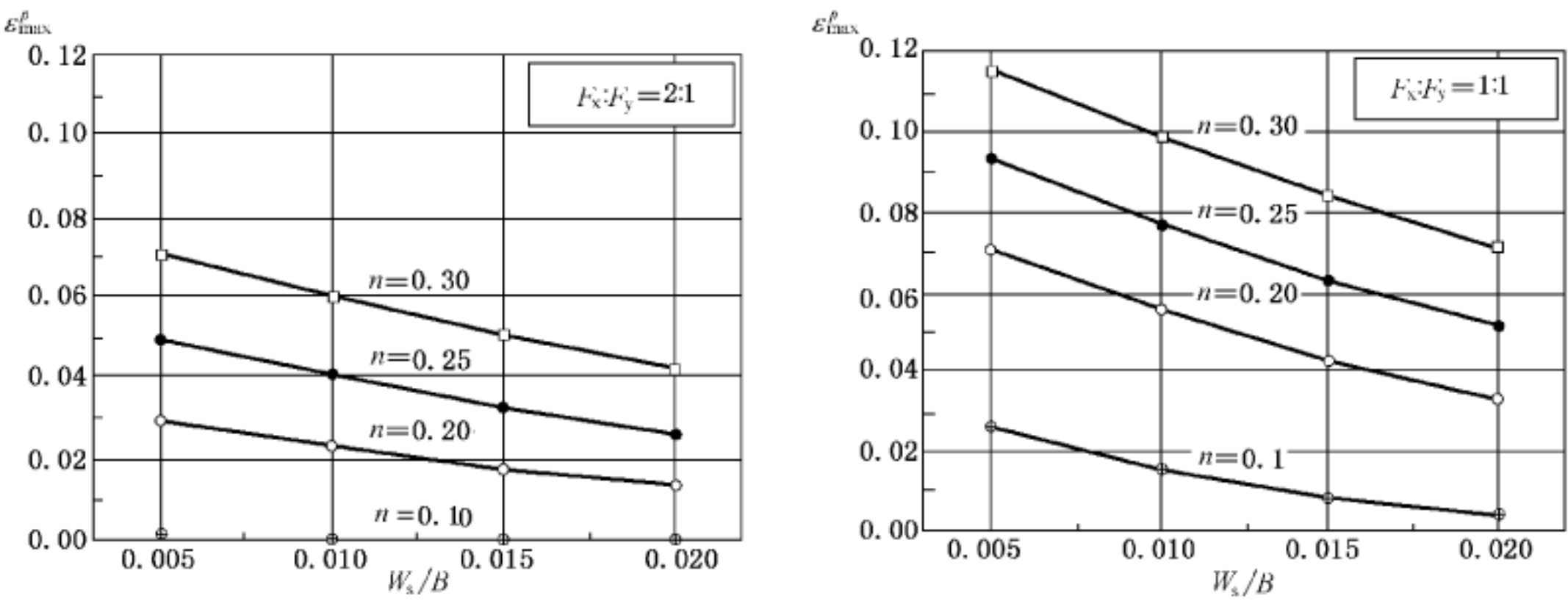


图 E.2 狭缝宽度对最大等效塑性应变的影响(材料模型:Von Mises 屈服准则)

参 考 文 献

- [1] GB/T 5028 金属材料 薄板和薄带 应变硬化指数(n 值)的测定(GB/T 5028—2008, ISO 10275:2007, MOD)
- [2] 任家陶, 李冈陵, 豆志武, et al. 双向拉伸试验的进展与钛板双向拉伸的强化研究[J]. 实验力学, 2001, 16(2): 196-206.
- [3] 肖瑞, 李晓星, 郎利辉, et al. 热环境复杂加载下各向异性板料屈服轨迹和等效应力-应变关系的建立[J]. 塑性工程学报, 2016, (2): 126-129.
- [4] Kuwabara T, Ikeda S, Kuroda K. Measurement and analysis of differential work hardening in cold-rolled steel sheet under biaxial tension[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 80-81: 517-523.
- [5] Kuwabara T, Van Bael A, Iizuka E. Measurement and analysis of yield locus and work hardening characteristics of steel sheets with different r -values[J]. Acta Materialia, 2002, 50(14): 3717-3729.
- [6] Shiratori E, Ikegami K. Experimental study of the subsequent yield surface by using cross-shaped specimens[J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968, 16(6): 373-394.
- [7] Kuwabara T, Kuroda M, Tvergaard V, et al. Use of abrupt strain path change for determining subsequent yield surface: experimental study with metal sheets[J]. Acta Materialia, 2000, 48(9): 2071-2079.
- [8] T N, S T, T K. Development of compact biaxial tensile testing machine using conventional compression testing machine and evaluation of the test results[C]. IDDRG 2010, 2010: 593-602.
- [9] Merklein M, Biasutti M. Development of a biaxial tensile machine for characterization of sheet metals[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 939-946.
- [10] Nowack H, Hanschmann D, Ott W, et al. Crack Initiation Life Behavior Under Biaxial Loading Conditions: Experimental Behavior and Prediction[J]. Astm Special Technical Publication, 1995, (1280): 25.
- [11] R.D. L. System Design for Multiaxial High-Strain Fatigue Testing[J]. Astm Special Technical Publication, 2000, 1387: 355-368.
- [12] Xiao R, Li X-X, Lang L-H, et al. Biaxial tensile testing of cruciform slim superalloy at elevated temperatures[J]. Materials & Design, 2016, 94: 286-294.
- [13] Xiao R, Li X-X, Lang L-H, et al. Forming limit in thermal cruciform biaxial tensile testing of titanium alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 240: 354-361.
- [14] Yoon J W, Barlat F, Dick R E, et al. Prediction of six or eight ears in a drawn cup based on a new anisotropic yield function[J]. International Journal of Plasticity, 2006, 22(1): 174-193.
- [15] Kuwabara T. Advances in experiments on metal sheets and tubes in support of constitutive modeling and forming simulations[J]. International Journal of Plasticity, 2007, 23(3): 385-419.
- [16] Kuwabara T, Hashimoto K, Iizuka E, et al. Effect of anisotropic yield functions on the accuracy of hole expansion simulations[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(3): 475-481.
- [17] Yanaga D, Kuwabara T, Uema N, et al. Material modeling of 6000 series aluminum alloy sheets with different density cube textures and effect on the accuracy of finite element simulation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2012, 49(25): 3488-3495.

- [18] Hu J, Marciniak Z, Duncan J. Mechanics of Sheet Metal Forming[M]. Springer US, 1978.
- [19] Hanabusa Y, Takizawa H, Kuwabara T. Numerical verification of a biaxial tensile test method using a cruciform specimen[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(6): 961-970.
-

中 华 人 民 共 和 国
国 家 标 准
金属材料 薄板和薄带
十字形试样双向拉伸试验方法
GB/T 36024—2018

*

中国标准出版社出版发行
北京市朝阳区和平里西街甲2号(100029)
北京市西城区三里河北街16号(100045)

网址: www.spc.org.cn

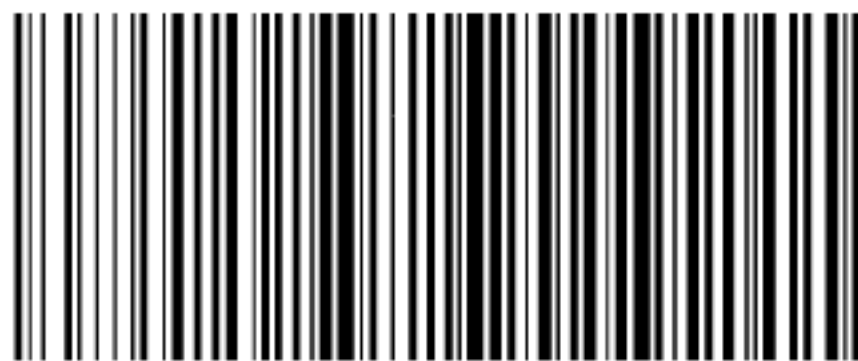
服务热线: 400-168-0010

2018年3月第一版

*

书号: 155066 · 1-59877

版权专有 侵权必究



GB/T 36024—2018